

团体标准

T/CES XXX-XXXX

特高压直流输电用
换流变压器网侧套管技术规范

Technical specification for line bushing of UHVDC converter transformer

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国电工技术学会 发布

目 次

1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
3.1 网侧高压套管 line bushing	1
3.2 油浸纸套管(OIP) oil-impregnated paper bushing	2
3.3 胶浸纸套管(RIP) resin-impregnated paper bushing	2
3.4 胶浸纸充绝缘脂套管 resin-impregnated paper bushing filled with insulating grease ..	2
4 技术要求	2
4.1 使用条件	2
4.2 最高电压标准值 U_m	2
4.3 额定电流 I_r	2
4.4 温升试验电流 I_{test}	2
4.5 热短时耐受电流 I_{th}	3
4.6 绝缘水平	3
4.7 机械强度	3
4.8 套管最高温度值和温升	3
4.9 套管的介质损耗因数($\tan \delta$)	4
4.10 套管的局部放电量	4
4.11 无线电干扰	5
4.12 油浸纸套管内部油的性能	5
4.13 结构设计及工艺	5
4.14 绝缘子外套	5
4.15 套管的保护和监测	5
5 试验要求与方法	6
5.1 一般要求	6
5.2 试验分类	6
5.3 绝缘和热试验时的套管条件	8
6 型式试验	8
6.1 工频干耐受电压试验	8
6.2 长时间工频耐受电压试验(ACLD)	9
6.3 雷电冲击干耐受电压试验(BIL)	10
6.4 操作冲击干和湿耐受电压试验 (SIL)	10
6.5 热稳定试验	11
6.6 电磁兼容试验(EMC)	11
6.7 温升试验	11
6.8 热短时电流耐受试验	12
6.9 悬臂负荷耐受试验	13
6.10 充液体套管的密封试验	13
6.11 充气套管的内压力试验	13
6.12 尺寸检查	13
7 逐个试验	13
7.1 环境温度下介质损耗因数($\tan \delta$)和电容量的测量	13
7.2 雷电冲击干耐受电压试验(BIL)	14
7.3 工频干耐受电压试验	14

7.4 局部放电量的测量 15

7.5 抽头绝缘的试验 16

7.6 充气套管的内压力试验 16

7.7 充液体套管的密封试验 16

7.8 充气套管的密封试验 16

7.9 法兰的密封试验 16

7.10 外观检查和尺寸检验 16

7.11 含水量测定 15

7.12 溶解气体气相色谱分析 15

8 特殊试验 16

8.1 抗震试验 16

9 运输、存放、安装和维护规则 16

9.1 运输、存放和安装要求 16

9.2 拆装与吊装 17

9.3 现场安装 17

9.4 运行维护 18

附录 A（资料性）油浸纸换流变压器网侧套管产气处理方案 19

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国电工技术学会提出。

本文件由中国电工技术学会标准工作委员会高电压试验技术及开关设备工作组归口。

本文件起草单位：国网经济技术研究院有限公司、中国电力科学研究院有限公司、西安西电高压套管有限公司、南京电气高压套管有限公司。

本文件主要起草人（按对标准的贡献大小排列）：晁阳、申笑林、陈晓东、赵峥、李明、李熙宁、刘立宝、鱼凯。

本文件为首次发布。

特高压直流输电用换流变压器网侧套管技术规范

1 范围

本文件规定了特高压直流输电用换流变压器网侧套管的范围、使用条件、技术要求以及试验要求等。

本文件适用于换流变压器网侧550kV及以上高压套管，包括油浸纸电容式换流变压器网侧高压套管、胶浸纸电容式换流变压器网侧高压套管和胶浸纸充气式套管换流变压器网侧高压套管。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 2536 电工流体 变压器和开关用的未使用过的矿物绝缘油
- GB/T 2900.1 电工术语 基本术语
- GB/T 2900.5 电工术语 绝缘固体、液体和气体
- GB/T 2900.8 电工术语 绝缘子
- GB/T 4109 交流电压高于 1000V 的绝缘套管
- GB/T 7252 变压器油中溶解气体分析和判断导则
- GB/T 7354 局部放电测量
- GB/T 11022 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求
- GB/T 11023 高压开关设备六氟化硫气体密封试验方法
- GB/T 12022 工业六氟化硫
- GB/T 16927.1 高压试验技术 第1部分：一般定义和试验要求
- GB/T 21429 户外和户内电气设备用空心复合绝缘子 定义、试验方法、接收准则和设计推荐
- GB/T 23752 额定电压为 1000V 以上的电气设备用空心增压和未增压陶瓷和玻璃绝缘子
- IEC 60137 交流电压高于 1000V 的绝缘套管
- IEC 60815 关于污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定方法
- IEC 61463 套管-地震条件
- IEC 62155 额定电压为 1000V 以上的电气设备用空心增压和未增压陶瓷和玻璃绝缘子

3 术语和定义

GB/T 2900.1、GB/T 2900.5、GB/T 2900.8、GB/T 4109界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

网侧高压套管 line bushing

用于换流变压器网侧高压出线端，与交流输电系统连接并承载一定分量的谐波电流的套管。

3.2

油浸纸套管 (OIP) oil-impregnated paper bushing

主绝缘是由纸卷绕的芯体，经处理后用绝缘液体（通常为变压器油）浸渍而构成的套管。

3.3

胶浸纸套管 (RIP) resin-impregnated paper bushing

主绝缘是由未经处理的纸卷制并随之用可固化的树脂浸渍的芯体的套管。

3.4

胶浸纸充绝缘脂套管 resin-impregnated paper bushing filled with insulating grease

主绝缘为胶浸纸电容芯体，电容芯体与套管外套间充绝缘脂，套管外套采用硅橡胶空心复合绝缘子的套管。

3.5

充气式套管 gas-insulated bushing

主绝缘为胶浸纸电容芯体，电容芯体与套管外套间充SF₆气体，套管外套采用硅橡胶空心复合绝缘子的套管。

3.6

绝缘酯 insulating ester

一种人工合成的、具有优异电气绝缘性能的液态化学物质。

4 技术要求

4.1 使用条件

本文件规定的套管使用条件应符合GB/T 4109中5.2、5.3、5.4要求。

本文件规定的套管应耐受一定分量的谐波电流，谐波电流频谱由交流系统条件确定。

4.2 最高电压标准值 U_m

换流变压器网侧高压套管最高电压 U_m 标准值为 550kV、800kV、1100kV。

4.3 额定电流 I_r

换流变压器网侧高压套管额定电流 I_r 在下列标准值中选取：

2000A，2500A，3150A。

4.4 温升试验电流 I_{test}

换流变压器网侧高压套管温升试验电流 I_{test} 为 3000A（1100kV）、3000A（800kV）、4000A（550kV）。

4.5 热短时耐受电流 I_{th}

换流变压器网侧高压套管应能耐受规定的热短时电流试验， I_{th} 为额定电流 I_r 的 25 倍，持续时间 t_{th} 为 2s。对于 I_r 等于或大于 4000A 的套管， I_{th} 始终应为 100kA。

4.6 绝缘水平

换流变压器网侧高压套管绝缘型式试验在 GB/T 4109 规定的最高电压档下进行，在不同套管最高电压 U_m 下绝缘水平应符合表 1 的规定。

表1 套管的额定绝缘水平

设备最高电压 U_m kV	雷电冲击耐受电压 kV（峰值）	操作冲击（干和湿）耐受电压 kV（峰值）	工频干耐受电压 kV（方均根值）
550	2015	1325	750（1min）
800	2685	1755	990（1min）
1100	2685	1950	1200（5min）

4.7 机械强度

换流变压器网侧高压套管应能耐受持续 60s 时间，悬臂负荷试验值应符合表 2 的规定。

表2 套管的悬臂耐受负荷

设备最高电压 U_m （kV）	额定电流 I_r （A）	
	2 000~2500	≥3150
	悬臂试验负荷（N）	
550	5000	5000
800	5000	5000
1100	8000	8000

厂家应考虑套管在工程中运行时，空气侧接线端子长期受到高压引线的拉力作用，避免套管出现形变和密封问题。

4.8 套管最高温度值和温升

换流变压器网侧高压套管在长期施加温升试验电流至稳定后，其各部位的发热温度和温升应不大于表 3 的规定。

表3 套管各部位允许的最高温度值和温升

部 件 说 明	最高温升 K	最高温度 °C	备 注 ^{注1}
导杆式套管载流导杆表面	75	105	注2

弹簧接触	铜和铜合金，无镀层 ——在空气中 ——在SF ₆ 中 ——在油中	45 60 50	75 90 80	注3
螺纹接触	铜、铝及其合金，无镀层 ——在空气中 ——在SF ₆ 中 ——在油中	60 75 70	90 105 100	
靠螺钉或螺栓连接到外部导体上的端子	铜、铝及其合金 ——无镀层 ——镀银板	60 75	90 105	
注1：温升的数值根据最大日平均温度30℃为基础； 2：仅针对胶浸纸电容芯体套管； 3：弹簧接触是靠弹簧压力维持连接的，例如插头连接。				

4.9 套管的介质损耗因数($\tan \delta$)

换流变压器网侧高压套管的介质损耗因数($\tan \delta$)在电压值为 $0.5 U_m / \sqrt{3}$ 、 $1.05 U_m / \sqrt{3}$ 、 $1.5 U_m / \sqrt{3}$ 、 U_m 下进行测量，最大值应符合表4的规定。

表4 套管的介质损耗因数($\tan \delta$) (20℃)

套管类型	$0.5 U_m / \sqrt{3}$ 电压下的最大值 %	$1.05 U_m / \sqrt{3}$ 电压下的最大值 %	电压从 $1.05 U_m / \sqrt{3}$ 到 U_m 的最大允许增值 %
油浸纸套管	0.4	0.4	0.10
胶浸纸套管	0.5	0.5	0.10
注： U_m 为设备最高电压。			

4.10 套管的局部放电量

换流变压器网侧高压套管的局部放电量应符合表5的规定。

表5 套管的局部放电量最大值

套管类型	局部放电量最大值 pC		
	U_m	$1.5 U_m / \sqrt{3}$	$1.1 U_m / \sqrt{3}$
油浸纸套管	5	5	5
胶浸纸套管	5	5	5
注： U_m 为设备最高电压。			

4.11 无线电干扰电压

换流变压器网侧高压套管在 $1.1U_m/\sqrt{3}$ 的试验电压下，无线电干扰电压应不大于500μV，且在户外晴天夜晚无可见电晕。

4.12 油浸纸套管内部油的性能

油浸纸换流变压器网侧高压套管在出厂前的所有绝缘试验结束后，进行套管内变压器油的性能测试，应符合表 6 规定。变压器油在充入套管前每 100mL 油中大于 5μm 的颗粒度应不大于 1000 个，并提供充油完毕后的测试结果。

表6 套管绝缘试验后变压器油性能值

设备最高电压Um kV	击穿电压 kV/2.5mm	tanδ% (90℃)	含水量 μL/L	油中溶解气体含量μL/L		
				乙炔	总烃	氢
550	≥60	≤0.4	≤10	0	≤10	≤30
800	≥60	≤0.4	≤10	0	≤10	≤30
1100	≥70	≤0.2	≤10	0	≤10	≤30

注：油中溶解气体含量测量用仪器最小灵敏度要求优于0.1μL/L。

4.13 结构设计及工艺

换流变压器网侧高压套管按绝缘结构型式可分为：油浸纸套管、胶浸纸充气套管、胶浸纸充绝缘脂套管^注。

注：主绝缘为胶浸纸电容芯体，电容芯体与套管外套间充绝缘脂，套管外套采用硅橡胶空心复合绝缘子的套管。

如采用 SF₆ 气体作为绝缘介质，套管应能提供至少三路独立的跳闸节点（和运行单位核实下）。同时 SF₆ 监视装置的安装方法应在图纸上表示。

采用拉杆结构的高压套管，拉杆与底部接线端应使用通孔螺接方式，防止拉杆载流和放电，金属拉杆中部连接位置应适当设置绝缘。

套管顶部载流引线端子不应采用螺纹连接结构（已采用了螺纹连接结构的套管应增加紧固措施，防止螺纹接触位置松动过热）。

连接套管末屏和试验抽头引出线应尽量减短和拉直，减少引线电感量。

套管在制造过程中，加强工艺（包括干燥）控制，减少平板电缆纸内褶皱，严格控制生产环境和套管部件的洁净度。

套管运行环境温度下油枕油位均能正确显示。

4.14 绝缘子外套

换流变压器网侧高压套管瓷绝缘子外套应符合 IEC 62155 的规定，应采用无机粘接工艺。空心复合绝缘子外套应符合 GB/T 21429。

空心绝缘子外套爬电、外形、直径系数以及表示伞裙形状的参数均应符合 IEC 60815 规定，S/P 不小于 0.9，CF 不大于 4。

4.15 套管的保护和监测

套管 SF6 压力或密度继电器应分级设置报警和跳闸。作用于跳闸的非电量保护元件应设置三副独立的跳闸接点，按照“三取二”原则出口。不应多副跳闸接点并联上送，“三取二”出口判断逻辑装置及其电源应冗余配置。

套管上应安装气体压力装置，应有三个独立的跳闸节点。每台穿墙套管应配置两路独立的模拟输出，配置 IED 设备和相应的传感器，IED 设备提供 DL/T 860 光纤接口，并配置布置 IED 设备的就地箱/柜。信号输出光纤由一体化平台配置。

5 试验要求与方法

5.1 一般要求

套管绝缘试验、温升试验和悬臂负荷耐受试验时应垂直安装。

5.2 试验分类

出厂的每一支换流变压器网侧高压套管应进行逐个试验。

新产品定型或正常产品修改结构、改变原材料及生产工艺时，应根据改变性质，进行产品型式试验的全部项目或部分项目试验。试验用的套管应与正常交货的套管相同。型式试验应在通过逐个试验合格后的产品中随机抽取 1 只，按顺序进行试验。试验时，如套管有不符合表中规定的任何一项要求时，则型式试验不合格。

5.2.1 型式试验

换流变压器网侧高压套管型式试验项目包括：

- 工频干耐受电压试验（见 6.1）
- 长时间工频耐受电压试验（ACLD）（见 6.2）
- 雷电冲击干耐受电压试验（见 6.3）
- 操作冲击湿耐受电压试验（见 6.4）
- 热稳定试验（见 6.5）
- 电磁兼容试验（见 6.6）
- 温升试验（见 6.7）
- 热短时电流耐受试验（见 6.8）
- 悬臂负荷耐受试验（见 6.9）
- 充液体套管的密封试验（见 6.10）
- 充气套管的内压力试验（见 6.11）
- 尺寸检查（见 6.12）

表 7 给出了各类型套管型式试验的适用范围。

表7 型式试验的适用范围(见5.2.1)

条款	项目缩写	适用套管型式
----	------	--------

6.1	工频	全部换流变压器网侧高压套管
6.2	ACLD	全部换流变压器网侧高压套管
6.3	雷电	全部换流变压器网侧高压套管
6.4	操作（干、湿）	全部换流变压器网侧高压套管
6.5	热稳定	全部换流变压器网侧高压套管
6.6	RIV	全部换流变压器网侧高压套管
6.7	温升	全部换流变压器网侧高压套管
6.8	热短时	全部换流变压器网侧高压套管
6.9	悬臂	全部换流变压器网侧高压套管
6.10	密封性	油浸纸套管
6.11	压力	胶浸纸充气式套管
6.12	尺寸	全部换流变压器网侧高压套管

5.2.2 逐个试验

- 换流变压器网侧高压套管逐个试验项目包括：
- 环境温度下介质损耗因数（ $\tan\delta$ ）和电容量测量（见 7.1）
 - 雷电冲击干耐受电压试验（见 7.2）
 - 工频干耐受电压试验（见 7.3）
 - 长时间工频耐受电压试验（ACLD）（见 7.4）
 - 局部放电量测量（见 7.5）
 - 抽头绝缘试验（见 7.6）
 - 充气套管的内压力试验（见 7.7）
 - 充液体套管的密封试验（见 7.8）
 - 充气的密封试验（见 7.9）
 - 法兰的密封试验（见 7.10）
 - 外观检查和尺寸检验（见 7.11）
 - 含水量测定（见 7.12）
 - 溶解气体气相色谱分析（见 7.13）
- 表 8 给出了各类型套管型式试验的适用范围。

表8 逐个试验的适用范围（见5.2.2）

条款	项目缩写	适用套管型式
----	------	--------

7.1	$\tan \delta$ /电容量	全部换流变压器网侧高压套管
7.2	雷电	全部换流变压器网侧高压套管
7.3	工频干	全部换流变压器网侧高压套管
7.4	ACLD	全部换流变压器网侧高压套管
7.5	局部放电	全部换流变压器网侧高压套管
7.6	抽头	胶浸纸充气式套管
7.7	内压力	油浸纸套管
7.8	液体密封性	胶浸纸充气式套管
7.9	气体密封性	全部换流变压器网侧高压套管
7.10	法兰处密封性	全部换流变压器网侧高压套管
7.11	外观和尺寸	全部换流变压器网侧高压套管
7.12	含水量测定	全部换流变压器网侧高压套管
7.13	色谱分析	全部换流变压器网侧高压套管

5.2.3 特殊试验

换流变压器网侧高压套管特殊试验项目如下：
——抗震试验（见 8.1）

5.3 绝缘和热试验时的套管条件

在进行换流变压器网侧高压套管的绝缘和热试验时，必须完整地具备固定法兰或其他固定装置及在使用时需要的全部附件，套管应浸在装有变压器油的尺寸合适的试验容器中。绝缘试验时位于试验容器中的套管油中端部的均压屏蔽罩要确保其表面场强足够低，使其在浸入的变压器中不发生局部放电。

油纸绝缘套管，须用规定质量的绝缘液体充至正常液面。气体绝缘的套管，须用规定类型的绝缘气体，充至气体在 20℃时的最低压力。如试验开始时温度不是 20℃，该压力应相应地调整。

逐个绝缘试验仅用来检查内绝缘,试验时可以对套管的外部金属附件进行屏蔽。

套管试验的安装布置通常应使其对周围的接地部件有足够的间距，以避免通过周围空气或浸入介质对其直接闪络。

在开始绝缘试验前，绝缘子应清洁干燥，并与周围空气处于热平衡状态。

6 型式试验

试验的次序或可能合并的项目由供方决定，但冲击耐受电压试验必须在工频干耐受电压试验（见 8.3）之前进行。在型式试验系列之前和之后应测量介质损耗因数、电容量（见 8.1）和局部放电量（见 8.4）以检查是否发生了损伤。

6.1 工频干耐受电压试验

6.1.1 适用范围

试验适用于所有换流变压器网侧高压套管。

6.1.2 试验方法和要求

表1中规定了试验电压值选取，与频率无关。

6.1.3 接收准则

试验时如没有出现闪络或击穿则认为套管通过了试验。如套管发生击穿，则认为套管没有通过本试验。排除了测量系统误差和环境温度影响，如果试验后测量的电容量高出相当于先前测得的电容大约一层的电容量，则认为其发生了击穿。如果出现一次闪络，则试验应仅重复一次，如在重复试验时未出现闪络或击穿，则认为该套管通过了本试验。

注：对于极板层数较多的换流变网侧高压套管，按照“试验后测量的电容高于先前测得的电容大约一层的电容量，认为其发生了击穿”这一原则来判定，应考虑环境温度变化和系统误差带来的影响，避免出现误判。对于胶浸纸电容式套管，温度对电容量影响较大，应尽量在环境温度相同的条件下进行套管电容量的对比测试。

6.2 长时间工频耐受电压试验 (ACLD)

6.2.1 适用范围

本试验适用于所有换流变压器网侧高压套管。

6.2.2 测试方法和要求

试验电压如图2所示：

- 升压至 $1.1U_m/\sqrt{3}$ ，持续时间为5min，测量局部放电；
- 升压至 $U_2=U_m$ ，持续时间为5min，测量局部放电；
- 升压至 $U_1=1.1U_m$ ，持续时间为1min，测量局部放电；
- 试验后平稳的降压至 U_2 并持续一段时间，至少60min，试验时持续时间与试验频率无关，并每隔5min 记录一次；
- 降压至 $1.1U_m/\sqrt{3}$ ，持续时间为5min，测量局部放电；
- 电压降至零。

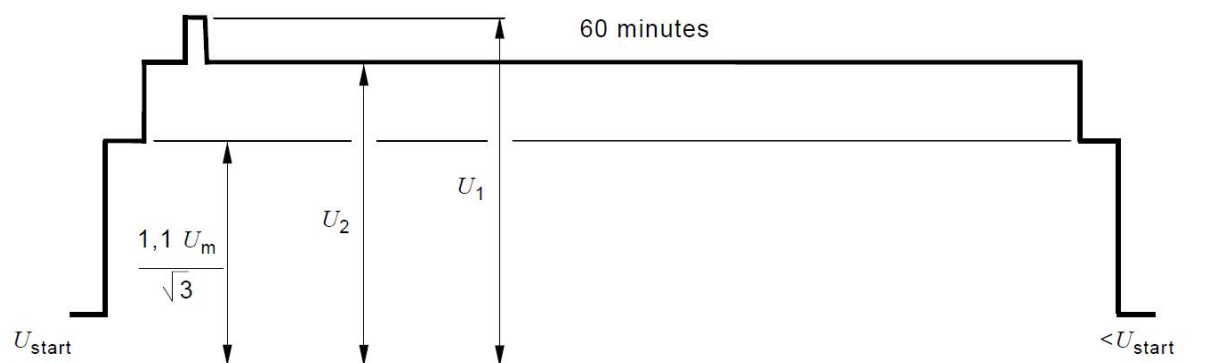


图1 长时间工频耐受电压曲线 (ACLD)

测试时间与测试频率是相互独立的。在所有测试电压下都要监测局放量并每5min记录一次测量结果。

6.2.3 接收准则

如果没有发生闪络或击穿则认为套管通过了该试验。排除了测量系统误差和环境温度影响，如果试验后测量的电容高出相当于先前测得的电容大约一层的电容量，则认为其发生了击穿。

6.3 雷电冲击干耐受电压试验（BIL）

6.3.1 适用范围

本试验适用于所有换流变压器网侧高压套管。

6.3.2 试验方法和要求

套管应逐次地经受：

- 15次正极性全波雷电冲击；
- 1次负极性全波雷电冲击，施加电压为额定雷电冲击耐受电压的110%；
- 5次负极性截波雷电冲击，施加电压为额定雷电冲击耐受电压的121%；
- 14次负极性全波雷电冲击，施加电压为额定雷电冲击耐受电压的110%。

额定雷电冲击耐受电压值按表1规定选取。

截波装置的放电时间应在2 μ s到6 μ s间。

改变极性后，允许在施加试验冲击前先施加几次较小幅值的冲击。连续两次施加电压间的时间间隔应足够长，以避免前次施加电压的影响。

6.3.3 接收准则

在下列情况下认为套管通过试验

- 在油端没有闪络；
- 在正极性下空气中的闪络不能超过2次；
- 在负极性下空气没有闪络。

则认为套管通过了本试验。

在每一极性下进行15次冲击中如发生击穿，则应至少再做5次冲击，这5次中不发生击穿才认为通过试验，如果这5次冲击中有一次击穿，可再进行冲击。

如果发生击穿，而且没有任何原因可以说明在测试时发生了可恢复性绝缘击穿，那么测试完毕后拆除并检查套管。如果观察到不可恢复性绝缘的击穿，则认为套管没有通过试验。

6.4 操作冲击干和湿耐受电压试验（SIL）

6.4.1 适用范围

所有换流变压器网侧高压套管应同时进行操作冲击干和湿耐受电压试验。

6.4.2 试验方法和要求

试验按GB/T 16927.1规定的方法和要求进行。为模拟运行状态，套管应安装在一接地平板上，该接地平板应沿套管的轴线径向每一方向至少伸出0.4L，L为套管干弧距离。高压接线应从套管轴线方向引出，至少应超出套管0.4L。

操作冲击湿耐受电压试验，套管应经受：

- 正极性15次额定操作冲击耐受电压；
- 负极性15次额定操作冲击耐受电压。

冲击波形为250/2500 μ s的标准操作冲击波形。

操作冲击干耐受电压试验，套管应经受：

- 负极性15次冲击，施加电压为110%额定操作冲击耐受电压。

额定操作冲击耐受电压值按表1规定选取。

允许在改变极性后在施加试验冲击前施加几次较小幅值的冲击。连续两次施加电压的时间间隔应足够长，以避免先前施加电压的影响。

6.4.3 接收准则

在下列情况下认为套管通过试验

- 在油端没有闪络；
- 在正极性下空气中的闪络不能超过2次；
- 在负极性下空气没有闪络。

则认为套管通过了本试验。

在每一极性下进行 15 次冲击中如发生击穿，则应至少再做 5 次冲击，这 5 次中不发生击穿才认为通过试验，如果这 5 次冲击中有一次击穿，可再进行冲击。

如果发生击穿，而且没有任何原因可以说明在测试时发生了可恢复性绝缘击穿，那么测试完毕后拆除并检查套管。如果观察到不可恢复性绝缘的击穿，则认为套管没有通过试验。

6.5 热稳定试验

6.5.1 适用范围

本试验适用于所有换流变压器网侧高压套管。每一批次的套管应选取一支进行试验。

6.5.2 试验方法和要求

套管端部应浸入油中。油温应为 $90^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。此温度应用浸入油中且在油面下约3cm，并离套管约30cm处的温度计测量。

相应于 I_t 时套管的导体损耗应用适当的方法模拟。一种方法是将一电阻性绝缘导线绕在模拟导体上并由一适当电源供电。适当调整导线的电阻和电流以产生与最终的导体相同的损耗。

试验电压应为： $0.8U_m$ ，试验应在油和套管间达到热平衡后开始。

试验时宜每30min测量一次介质损耗因数，且每次测量都应同时记录环境温度。

当套管的介质损耗因数在环境温度条件下5h内无明显上升趋势时，即套管达到热稳定。

6.5.3 接收准则

如果达到了热稳定且随后的逐个绝缘耐受试验与先前的结果没有明显变化时则认为套管通过了本试验。

6.6 无线电干扰电压试验（RIV）

所有换流变压器网侧高压套管进行该项试验，试验应按照 GB/T 4109中8.7进行。

6.7 温升试验

6.7.1 适用范围

本试验适用于所有换流变压器网侧高压套管。

6.7.2 试验方法和要求

换流变压器网侧高压套管温升试验时，套管空气侧绝缘外套应布置在充空气箱体中，套管变压器油中侧应布置在充油箱体内。充空气箱体的内壁距离套管表面不小于0.5m，试验箱体和套管采用垂直方式进行试验。试验过程中充空气箱体温度保持在 $50^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，充油箱体内的油温保持在 $90^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

套管内部热点温度通过直接在内部布置测温元件进行测量。对于导杆式套管，温度测量点伸入套管电容芯体内的部分，应在载流导杆表面均匀布置热电偶或其他测温元件；对于胶浸纸电容芯体套管，温度测量点应在电容芯体上打孔至卷制管表面布置热电偶或其他测温元件；对于油浸纸电容芯体套管，在芯子卷制前，应在卷制管的表面均匀埋设热电偶或其他测温元件。套管电容芯体内相邻温度测量点的距离 $\leq 300\text{mm}$ 。如果载流导杆存在连接部位(如焊接部位)，每一连接部位布置测量点不少于两个。

温升试验电流按4.3要求取值，试验电流频率为50Hz。

充油箱体内的油和充空气箱体内部的环境空气温度的测量点不少于3个。油温的测量，测温点应放置在离套管30cm处、油面以下3cm处。

试验应在额定频率下的 $I_{\text{test}} \pm 2\%$ 下进行，套管的所有部件应基本上处在地电位。

试验时所用的临时外部接线尺寸不应对所试套管带来明显冷却作用。如果从套管端子到沿连接线相距1m处的温度降低值不超过5K，则认为满足了此条件。

试验应连续进行，到温升没有明显变化时为止。施加电流后每小时测量一次各温度测量点的温度值，如果在试验电流下连续3h内每1h期间内所有测量点的温度变化不超过 $\pm 1\text{K}$ ，视为套管热点温度达到稳定，记录各测量点的温度。

6.7.3 接收准则

记录的各测量的温度和温升同时满足表3规定的极限值且无结构损伤，则认为套管通过温升试验。

6.8 热短时电流耐受试验

6.8.1 适用范围

本试验适用于所有换流变压器网侧高压套管。

6.8.2 试验方法和要求

用下式计算验证套管耐受 I_{th} 标准值的能力：

$$\theta_f = \theta_0 + \alpha \frac{I_{\text{th}}^2}{S_t \times S_e} \times t_{\text{th}} \quad (4)$$

式中：

θ_f ——导体的最终温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

θ_0 ——在环境温度 50°C 下载流 I_t 连续运行时导体的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

α ——对于铜是 $0.8(\text{K/s})/(\text{kA}/\text{cm}^2)^2$ ，对于铝是 $1.8(\text{K/s})/(\text{kA}/\text{cm}^2)^2$ ；

t_{th} ——规定的额定持续时间，取2s；

I_{th} ——上述规定的标准值，kA；

S_e ——考虑集肤效应的等效横截面面积， cm^2 ；

S_t ——相应于 I_t 的总横截面面积， cm^2 。

对于其它材料的 α 值，可由下式：

$$\alpha = \frac{\rho}{c \times \delta} \quad (5)$$

式中： ρ ——导体电阻率， $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ ；

c ——比热容， $\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ ；

δ ——导体密度， g/cm^3 。

用于公式中的 ρ 、 c 、和 δ 各值需在平均温度 160°C 下进行校正。

在直径 D （cm）的圆截面导体中，需考虑集肤效应取得等值横截面面积。其值可由下式导出的电流渗入深度 d （cm）来确定：

$$d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \times 10^3}{f}} \quad (6)$$

式中 f 为额定频率，取50Hz；

因此： $S_e = \pi d(D - d)$ 。

6.8.3 接收准则

如果 θ_f 不超过180°C，则认为套管能耐受标准值 I_{th} 。

如计算的温度超过了这个极限，套管耐受标准值 I_{th} 的能力应通过试验来证实。试验应如下进行：

——套管可以安装在任何位置；

——通过导体的电流应至少为按4.3标准值 I_{th} 和持续时间 t_{th} ，导体横截面应与额定电流 I_r 相适应。

试验前套管应施加一个电流，该电流使套管产生一个稳定的导体温度。这一温度应与套管在最高环境温度下施加额定电流时产生的稳定温度相同。

如果无可见的损伤且能重复耐受全部逐个试验项目并且与先前的结果比较没有明显变化，则认为套管通过了本试验。

6.9 悬臂负荷耐受试验

试验应按照GB/T 4109中8.9进行。

本试验适用于所有换流变压器网侧高压套管。

施加的悬臂负荷值应按表2要求取值。

采用空心复合绝缘子作为外绝缘的套管，需在做完温升试验后两小时内完成悬臂负荷耐受试验，试验持续时间为不低于30min。

6.10 充液体套管的密封试验

油浸纸套管进行该项试验，试验应按照 GB/T 4109 中 8.10 进行。

6.11 充气套管的内压力试验

胶浸纸充气式套管进行该项试验，试验应按照 GB/T 4109 中 8.11 求进行。

6.12 尺寸检查

所有换流变压器网侧高压套管进行该项试验，试验应按照 GB/T 4109 中 8.13 进行。接收准则为，套管的尺寸应符合相关图纸规定，特别是对规定有特殊公差的每一个尺寸以及影响互换性的尺寸。

7 逐个试验

由供方选定试验的次序和可能合并的项目，但当含有冲击耐受电压试验时，该冲击耐受电压试验应在工频耐受电压试验（见 8.3）前进行。在逐个绝缘试验前和试验后应进行介质损耗因数（ $\tan\delta$ ）和电容量（见 8.1）的测量以校验是否出现了损伤。在最后一次 $\tan\delta$ 测量前应进行局部放电量测量（见 8.4）。

7.1 环境温度下介质损耗因数（ $\tan\delta$ ）和电容量的测量

7.1.1 适用范围

本测量适用于所有换流变压器网侧高压套管。

7.1.2 试验方法和要求

试验时套管导体应不载流。测量应在10°C到40°C的环境温度下用西林电桥或其它适宜设备进行，测量应在10kV、 $1.05 U_m/\sqrt{3}$ 、 $1.5 U_m/\sqrt{3}$ 和 U_m 电压下进行。

7.1.3 接收准则

$\tan\delta$ 的最大允许值以及 $\tan\delta$ 随电压的增值列于表4，如测得的值不能通过，允许等待1h后重复该试验。

测量期间的环境温度应记录在报告中。

7.2 雷电冲击干耐受电压试验 (BIL)

7.2.1 适用范围

本测量适用于所有换流变压器网侧高压套管。

7.2.2 试验方法和要求

试验应按GB/T 4109中9.2.2 进行。

套管应逐次经受：

- 施加额定耐受值的105%的1次负极性全波雷电冲击；
- 施加额定耐受值的115%的2次负极性截波雷电冲击；
- 施加额定耐受值的105%的2次负极性全波雷电冲击。

额定雷电冲击耐受电压值按表1规定选取。

7.2.3 接收准则

如果符合GB/T 4109中9.2.3规定，则认为套管通过试验。

7.3 工频干耐受电压试验

7.3.1 适用范围

本测量适用于所有换流变压器网侧高压套管。

7.3.2 试验方法和要求

试验电压如下所示：

- 升压至 $1.1U_m/\sqrt{3}$ 持续时间为 5min；
- 升压至 $U_2=1.5U_m/\sqrt{3}$ 持续时间为 5min；
- 升压至 $U_1=U_m$ 持续时间为 1min；
- 试验后平稳的降压至 $U_2=1.5U_m/\sqrt{3}$ 并持续一段时间，至少 60min，试验时持续时间与试验频率无关，在降压过程中要检测局部放电，并每隔 5min 记录一次；
- 降压至 $1.1U_m/\sqrt{3}$ 持续时间 (E) 为 5min，测量局部放电；
- 电压降至零。

7.3.3 接收准则

试验时如没有出现闪络或击穿则认为套管通过了试验。如套管发生击穿，则认为套管没有通过本试验。排除了测量系统误差和环境温度影响，如果试验后测量的电容量高出相当于先前测得的电容大约一层的电容量，则认为其发生了击穿。如果出现一次闪络，则试验应仅重复一次，如在重复试验时未出现闪络或击穿，则认为该套管通过了本试验。

在测试的任一阶段，不同类型套管的局部放电量上限见表 5。

7.4 长时间工频耐受电压试验 (ACLD)

7.4.1 适用范围

本试验适用于所有换流变压器网侧高压套管。

7.4.2 测试方法和要求

试验电压如图2所示：

- 升压至 $1.1U_m/\sqrt{3}$ ，持续时间为5min，测量局部放电；
- 升压至 $U_2=U_m$ ，持续时间为5min，测量局部放电；
- 升压至 $U_1=1.1U_m$ ，持续时间为1min，测量局部放电；
- 试验后平稳的降压至 U_2 并持续一段时间，至少60min，试验时持续时间与试验频率无关，并每隔5min 记录一次；
- 降压至 $1.1U_m/\sqrt{3}$ ，持续时间为5min，测量局部放电；
- 电压降至零。

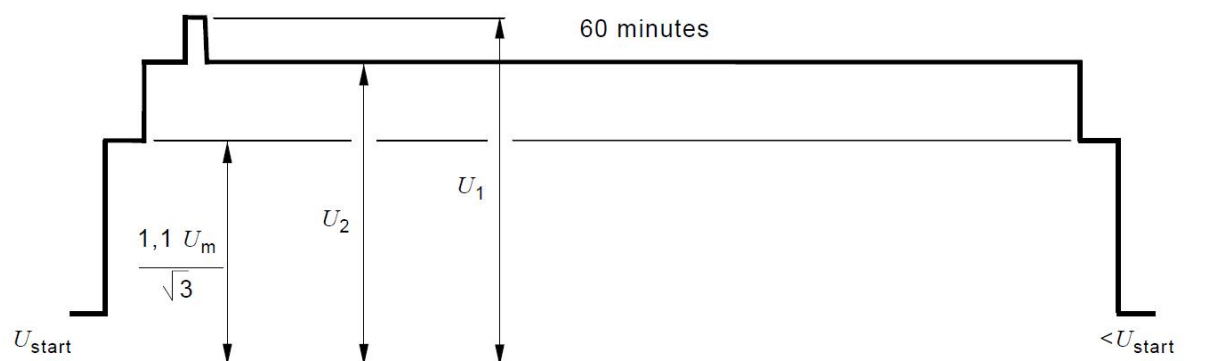


图1 长时间工频耐受电压曲线 (ACLD)

测试时间与测试频率是相互独立的。在所有测试电压下都要监测局放量并每5min记录一次测量结果。

7.4.3 接收准则

如果没有发生闪络或击穿则认为套管通过了该试验。排除了测量系统误差和环境温度影响，如果试验后测量的电容高出相当于先前测得的电容大约一层的电容量，则认为其发生了击穿。

7.5 局部放电量的测量

7.5.1 适用范围

本测量应对所有类型的换流变压器网侧高压套管进行。

7.5.2 试验方法和要求

本试验应按GB/T 7354进行。

除非另有规定，应适当选择试验回路的元件，使其能测量回路上的背景噪音和灵敏度，能检出5pC局部放电量或规定值的20%，取其中较大值。

此测量应在工频干耐受电压试验后，电压从工频干耐受电压试验值降至表5给出电压值时进行。

7.5.3 接收准则

在最后的绝缘试验后局部放电量的允许最大值，按套管的种类在表5中给出。

当在 $1.5U_m/\sqrt{3}$ 电压下测得值比表5中的大时，供方可延长测试时间到1小时，以检验其值是否会回到允许极限值。如果在此期间局部放电量在极限值内，则认为套管通过了该试验。在绝缘试验前的局部放电测量仅是为了提供数据。

7.6 抽头绝缘的试验

所有换流变压器网侧高压套管进行该项试验，试验应按照GB/T 4109中9.5进行。

7.7 充气套管的内压力试验

胶浸纸充气式套管进行该项试验，试验应按照GB/T 4109中9.6求进行。

7.8 充液体套管的密封试验

油浸纸套管在绝缘试验后对整个绝缘子外套进行密封试验，试验应按照GB/T 4109中9.7进行。

7.9 充气套管的密封试验

胶浸纸充气式套管进行该项试验，试验应按照GB/T 4109中9.8求进行。

7.10 法兰的密封试验

所有换流变压器网侧高压套管进行该项试验，试验应按照GB/T 4109中9.9进行。

7.11 外观检查和尺寸检验

所有换流变压器网侧高压套管进行该项试验，试验应按照GB/T 4109中9.10进行。

7.12 含水量测定

所有换流变压器网侧高压套管进行该项试验，试验应按照GB/T 4109中9.11进行。

7.13 溶解气体气相色谱分析

所有换流变压器网侧高压套管进行该项试验，试验应按照GB/T 4109中9.12进行。

8 特殊试验

8.1 抗震试验

参考IEC 61463进行。

9 运输、存放、安装和维护规则

换流变压器网侧高压套管的运输、存放、安装、运行和维护都应按照供方提供的说明书来执行。

因此，供货商应提供套管的运输、存放、安装、运行和维护的说明书。运输和存放的说明书应在供货之前提供，而安装、运行和维护说明书最迟应在供货时提供。供货商提供的说明书必须包含以下给出的重要信息。

9.1 运输、存放和安装要求

套管在运输、储存和安装过程中对绝缘的保护应采取专门措施，在通电之前应防止产品受潮，例如要防止雨水、积雪和凝露。应当考虑运输过程中的震动，对运输包装采取缓冲措施。运输时套管加速度控制在不大于 3g，并在套管上安装三维冲撞记录仪。套管连同换流变压器完成出厂试验后，运输至安装现场时，应与原包装和运输方式保持一致。

9.2 拆装与吊装

提供安全拆装和吊装所必需的信息，包括详细的吊装步骤和必要的设备。

在套管运抵目的地后，安装前应按供方提供的说明书检验清楚。对于充气体换流变压器网侧高压套管，在环境温度下气体压力应高于大气压。

9.3 现场安装

制造商提供的每种类型套管的说明书都应至少包括以下内容。

9.3.1 安装说明

安装说明中应指出以下内容：

- 套管的重量；
- 套管的重量（或者是将要安装的最重的零部件）是否超过 100kg；
- 重心位置。

充气体换流变网侧高压套管应充以指定的气体，例如符合 GB/T 12022 的未使用过的 SF₆ 气体。充气结束时的压力为在标准大气条件下（20℃和 101.3kPa）的额定充气压力。

9.3.2 连接说明

说明书中应包含以下信息：

- 在连接导体时应注意防止套管过热和不必要的损伤，留出足够的间距；
- 所有辅助电路的连接；
- 液体和气体系统的连接，如需要，说明所需管道的大小和排列方式；
- 接地连接。

9.3.3 最终安装检查

应提供在套管安装和连接完毕后进行检查和测试的说明书，应包括以下内容：

- 正常运行设定的测试计划表；
- 执行所有能使套管正常运行的调节程序；
- 提供一些帮助设备运行中的维护建议；
- 最终检查和投入运行的说明书。

测试和检查结果应记录于投运报告中。

充气体换流变压器网侧高压套管按以下内容检查：

——气体压力测量：在标准大气条件下（20℃和 101.3kPa）充气结束时的压力值不能低于最低设计压力也不能高于绝缘气体的额定填充压力。

——露点测试：在额定填充压力下，在环境温度为 20℃时测量露点的温度不能低于-5℃。在其它温度下的测量值要适当的修正。

——外套密封的检查：应按逐个试验规定的封闭压力系统探测法（见 8.8）进行检查。检查应在套管充入气体后至少一小时后开始，以使泄漏达到稳定。此项检查仅限于用适宜的泄漏探测器对密封圈、过压保护装置、阀、端头、压力计、温度传感器等

进行检查。

——在带电调试前应检测 SF₆ 气体组分和微水含量，并采用包扎法检查套管整个绝缘子外套 SF₆ 气体泄漏率。

采用拉杆结构的换流变压器网侧高压套管在安装时应使用专用安装工具安装和检查拉杆系统安装质量。

9.4 运行维护

运行中的换流变压器网侧高压套管应巡视红外温度、SF₆ 气体压力、油位显示。油浸纸换流变压器网侧高压套管在带电调试前和 168h 试运行后应对套管油样进行检测。对存在缺陷的高压套管，建议跟踪油色谱、气体组分和微水含量、SF₆ 气体泄漏检测结果，及时开展运行状态分析工作。

附录 A

(资料性)

油浸纸换流变压器网侧套管产气处理方案

油纸绝缘套管油色谱测量设备 C_2H_2 的测量灵敏度需小于 $0.1\mu L/L$ ，出厂试验 C_2H_2 含量应为 0，套管生产厂家应现场运行单位取油方法和要求进行指导。

套管投运后 10 年内出现油色谱异常情况（即 $C_2H_2 > 1\mu L/L$ 或者 C_2H_2 年增长率超过 $0.3\mu L/L$ ），套管厂家免费提供一根套管。换流变网侧套管产气时按附表 1 方案处理。

表 A.1 油浸纸换流变压器网侧套管 C_2H_2 含量异常处理方案

取油样时间	C_2H_2 水平	处理
换流变出厂试验后和168h试运行结束后	$\leq 0.1\mu L/L$	无需处理
	$0.1\mu L/L < C_2H_2 \leq 1\mu L/L$ 且增长值不超过 $0.1\mu L/L$ （168h 后与随换流变出厂后相比）	套管不需要更换，质保顺延 3 年
	$0.1\mu L/L < C_2H_2 \leq 1\mu L/L$ 且增长值超过 $\geq 0.1\mu L/L$ （168h 后与随换流变出厂后相比），或 $> 1\mu L/L$	套管厂提供免费套管更换
投运12个月、24个月、36个月	$\leq 0.1\mu L/L$	无需处理
	$0.1\mu L/L < C_2H_2 \leq 1\mu L/L$ 且年增长率不超过 $0.3\mu L/L$	套管不需要更换。套管厂应从油取样时间节点开始延长3年质保。如果在延保的3年内 $C_2H_2 \leq 1\mu L/L$ 且年增长率不超过 $0.3\mu L/L$ ，3年延保结束后，质保期结束。
	$C_2H_2 > 1\mu L/L$ 或者年增长率超过 $0.3\mu L/L$	套管厂提供免费套管更换
投运36个月后	—	质保期结束
注：建议试验后24h待乙炔气体充分扩散稳定再取样测量。建议测量乙炔（如 $0.1\mu L/L$ ）多次取样测量。		